

涡旋光束在海洋湍流中传输的闪烁因子

张凯宁, 刘永欣*, 蒲继雄

华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 厦门 福建 361021

摘要 采用分步相位屏方法仿真涡旋光束在海洋中的传输, 并对涡旋光束在海洋湍流中传输的光强和闪烁因子进行仿真计算。研究发现, 随着传输距离的增加, 涡旋光束的光斑逐渐扩散开来, 且中心暗斑也在逐渐消失。通过改变湍流相位屏参数模拟不同强度的海洋湍流, 发现随着均方温度耗散率变大, 或温度、盐度波动的相对强度变大, 或单位质量液体中的湍流动能耗散率变小, 涡旋光束的轴上点闪烁因子也会变大。当传输距离达到一定值时, 涡旋光束的闪烁因子会逐渐低于高斯光束, 且拓扑荷数越大闪烁因子降低得越明显。

关键词 光束传输与控制; 闪烁因子; 涡旋光束; 海洋湍流; 传输

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0705001

Scintillation Index of Vortex Beams Propagating in Oceanic Turbulence

Zhang Kaining, Liu Yongxin*, Pu Jixiong

Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract The intensity and scintillation index of vortex beams propagating in the oceanic turbulence are simulated by using a step-by-step phase screen method. We find that the vortex beam spot diffuses gradually and the central dark spot gradually disappears with increase in the propagation distance. By changing the parameters of the turbulent phase screen to simulate the oceanic turbulence with different strengths, we find that the on-axis scintillation index of the vortex beam increases with increase of the mean-square temperature dissipation rate, increase of the relative strength of temperature and salinity fluctuations, or decrease of turbulent kinetic energy dissipation rate per unit mass of fluid. The scintillation index of the vortex beam is lower than that of the Gaussian beam when the propagation distance reaches a certain value, and the larger the topological charge is, the more rapidly the scintillation index descends.

Key words beam propagation and control; scintillation index; vortex beam; oceanic turbulence; propagation

OCIS codes 350.5500; 260.5430; 050.1940; 050.4865

1 引言

随着光通信技术的发展, 光在各个不同介质中的传输特性引起了研究人员的关注。地球表面大部分被海洋覆盖, 因此, 研究光束在海水中的传输性质对光通信技术的发展有着十分重要的意义。早在 1978 年, Hill 等^[1]就研究了海水盐度和温度对光束的影响。随后, 国内外研究人员逐渐展开了光束在海洋湍流中的传输与闪烁指数的研究^[2-9]。浙江大学赵道木课题组^[2-5]先后研究了电磁涡旋光束和电磁非均匀相干光束在海洋湍流中的传输特性, 以及

随机各向异性电磁光束在海洋湍流中的光谱变化; 四川师范大学季小玲课题组^[6-7]研究了海洋湍流对高斯阵列光束以及部分相干环状偏心光束的传输特性的影响; Yousefi 等^[8]研究了锁相部分相干平顶阵列光在海洋湍流中传输时闪烁因子的变化。Nootz 等^[9]研究了不同计算参数的湍流对光束在海洋中传输特性的影响。罗燊娟等^[10]对海洋湍流中扩展物体漫反射光成像进行了数值模拟。牛超君等^[11]开展了利用相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性的研究。

以上研究仅限于理论模拟。由于海洋环境的复

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(61505059, 61575070, 61275203)、华侨大学研究生科研创新基金

* E-mail: yongxin@hqu.edu.cn

杂性,在实际海洋环境中开展实验有一定困难,因此本文选择利用计算机来仿真涡旋光束在海洋中的实际传输。采用湍流随机相位屏方法,将连续空间中的湍流影响等效为多个等间距的湍流相位屏的叠加,然后通过湍流随机相位屏模型和角谱传输公式模拟光束在海水湍流中的实际传输,并计算其轴上点的闪烁指数。

2 基本原理

2.1 仿真实论

使用在光束传输路径 z 上加入等间距的多个湍流相位屏的方法。相位屏厚度可忽略不计,仅用来模拟实际情况下湍流的影响,其中两个相位屏的间距 $\Delta z = 15$ m。初始光场为涡旋光束,沿 z 方向传输 Δz 距离后加入一面随机湍流相位屏,让光束继续沿 z 方向传输 Δz 距离,再加入一面随机湍流相位屏。后续步骤即重复上述过程,直至光束到达接收屏。

初始点的涡旋光场可以表示为

$$U_0(x, y) = \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{w_0} \right)^m \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right) \exp\left(im \arctan \frac{y}{x}\right), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为光场中点的坐标; w_0 为光束的束腰半径; m 为涡旋光束的拓扑荷数。仿真中设 $w_0 = 0.01$ m, 用 $x-y$ 平面内 $N \times N$ 个点组成的矩阵表示光场, $N = 1024$, 矩阵的总边长 L_{side} 为 1 m, 矩阵的范围为 $-L_{\text{side}}/2 < x < L_{\text{side}}/2$, $-L_{\text{side}}/2 < y < L_{\text{side}}/2$ 。光束产生后, 到达第一个相位屏之前的传输过程可以视为在空间中的自由传输, 按照角谱传播公式, 到达第一个相位屏之前的光场可以表示为^[12]

$$U_{1-}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F}[U_0(x, y)] \cdot U_p(k_x, k_y) \}, \quad (2)$$

式中: \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别为二维傅里叶变换和二维傅里叶逆变换; k_x, k_y 分别为 x, y 方向的空间频率; U_p 为角谱传递函数。通过相位屏后的光场可以表示为

$$U_{1+}(x, y) = U_{1-}(x, y) \exp[i\varphi_r(x, y)], \quad (3)$$

式中: $\varphi_r(x, y)$ 为相位屏中所包含的相位。

2.2 湍流相位屏产生方法

产生海洋湍流相位屏的方法如下^[13]。

1) 沿一个维度定义矩阵的总长度 L_{side} 和采样点数 N , 将其延伸至两个维度, k_x, k_y 可以表示为 $k_x = k_y = (2\pi/L_{\text{side}}) N_C$, 其中 N_C 表示 k_x, k_y 所对

应的取样点值, 取值范围为 $[-N/2, N/2-1]$ 。

2) 将服从标准正态分布的随机数放入矩阵中每一个采样点。

3) 计算能量谱密度函数的平方根 $(2\pi \cdot k^2 \cdot \Delta z \cdot \Phi_n)^{1/2}$, 其中 Φ_n 为海水折射率波动谱, k 为波矢大小, $k = 2\pi/\lambda$, Δz 为一次传输的距离; 将其与(2)式中得到的随机矩阵相乘。

4) 进行二维快速傅里叶逆变换。

5) 对得到结果的实部取 2π 的模值, 将此结果作为随机湍流相位屏的相位, 即 $\varphi_r(x, y)$ 。

考虑海洋湍流为各项同性且均匀分布, 可将 Φ_n 用一维谱表示为^[14]

$$\Phi_n(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \epsilon^{-1/3} \kappa^{-11/3} \times [1 + 2.35(\kappa\eta)^{2/3}] f(\kappa, \omega, x_t), \quad (4)$$

式中: $\eta = 10^{-3}$ m 为 Kolmogorovo 微尺度(内尺度); κ 为空间频率; $f(\kappa, \omega, x_t)$ 为关于 κ, ω, x_t 的函数, ω 为温度、盐度波动的相对强度, 其在海洋中的取值为 $-5 \sim 0$, 取 0 时证明温度主导湍流的影响, 取 -5 时证明盐度主导湍流的影响, x_t 为均方温度耗散率, 取值范围为 $10^{-10} \sim 10^{-4}$ K²/s; ϵ 为单位质量液体中的湍流动能耗散率, 取值范围为 $10^{-10} \sim 10^{-1}$ m²/s³。 $f(\kappa, \omega, x_t)$ 可以表示为^[14]

$$f(\kappa, \omega, x_t) = \frac{x_t}{\omega^2} [\omega^2 \exp(-A_T \delta) + \exp(-A_S \delta) - 2\omega \exp(-A_{TS} \delta)], \quad (5)$$

式中: $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$, 分别为通过大量实验测得的参数值。

2.3 闪烁因子的表示形式

闪烁因子的表达式为^[15]

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (6)$$

式中: 尖括号表示系综平均值; I 为光强值。光束在随机介质中传输时, 各种介质的散射以及折射等会引起光强出现涨落, 即闪烁现象。光束某一点的强度变化剧烈程度可用闪烁因子表示, 闪烁因子越大, 光束的强度变化越剧烈。为了更好地计算闪烁因子, 选取相同参数下传输 500 次的光强平均值作为系综平均值。

3 仿真结果与分析

3.1 光斑强度分布

根据上述方法, 利用 MATLAB 对涡旋光束经过海洋湍流传输后的光强和闪烁因子进行数值仿

真,得到图 1~6 所示结果。图 1 中横纵坐标 x 、 y 表示光斑尺寸,图 1(a)~(c)[图 2(a)~(c)]和图 1(d)~(f)[图 2(d)~(f)]分别为拓扑荷数 $m=1$ 和 $m=2$ 时涡旋光束在海洋湍流中传输到不同距离处的光强分布及相位分布。其中 $\epsilon=10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $x_t=10^{-7} \text{ K}^2/\text{s}$, $\omega=-2.5$; 如无特殊说

明,其他默认参数值设定为 $N=1024$, $L_{\text{side}}=1 \text{ m}$, $w_0=0.01 \text{ m}$ 。由光强图可以看出,随着传输距离的增加,涡旋光束的光斑逐渐扩散开来,且中心暗斑也在逐渐消失,光强分布变得不稳定。从相应的相位图可以看出,经海洋湍流传输后相位分布也受到湍流的影响,原本易于分辨的相位奇点变得难以分辨。

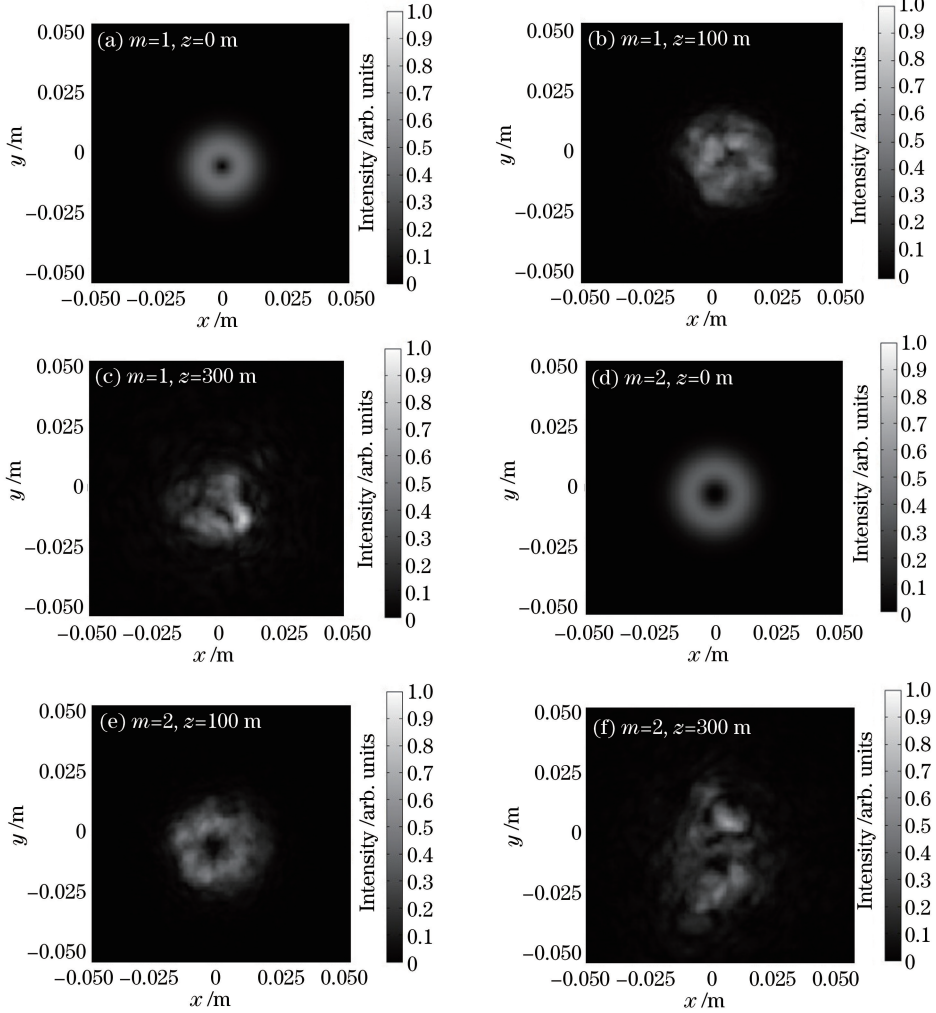


图 1 拓扑荷数 $m=1$ 及 $m=2$ 时涡旋光束在海洋湍流中传输到不同距离处的光强分布
Fig. 1 Intensity distributions of vortex beams with topological charges $m=1$ and $m=2$ propagating at different propagation distances in oceanic turbulence

3.2 不同拓扑荷数及波长对轴上点闪烁因子的影响

图 3 所示为不同拓扑荷数的涡旋光束在海洋传输中轴上点的闪烁因子随传输距离的变化情况,相应参数取值为 $\epsilon=10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $x_t=10^{-7} \text{ K}^2/\text{s}$, $\omega=-2.5$ 。由图 3 可以看出,传输距离较近时,拓扑荷数 $m=1, 3, 5$ 的涡旋光束的闪烁因子大于 $m=0$ 的高斯光束的闪烁因子,但随着传输距离的增加,拓扑荷数 $m=1, 3, 5$ 的涡旋光束的闪烁因子逐渐低于 $m=0$ 的高斯光束的闪烁因子,且拓扑荷数越大,传输一定距离后的闪烁因子越小。

图 4 所示为不同波长的涡旋光束在海洋湍流中闪烁因子随传输距离的变化情况,相应参数取值为 $\epsilon=10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$, 拓扑荷数 $m=1$, $x_t=10^{-7} \text{ K}^2/\text{s}$, $\omega=-2.5$ 。由图 4 可以看出,随着传输距离的增加,不同波长的涡旋光束的闪烁因子都在增加,在同一距离处,波长越小的涡旋光束闪烁因子越大。这是因为光束的波长越长,散射效应越弱,因而波长较长的光束受湍流影响小于波长较短的光束。

3.3 不同海洋湍流参数对轴上点闪烁因子的影响

图 5 所示为 $m=1$ 的涡旋光束在不同 x_t 取值

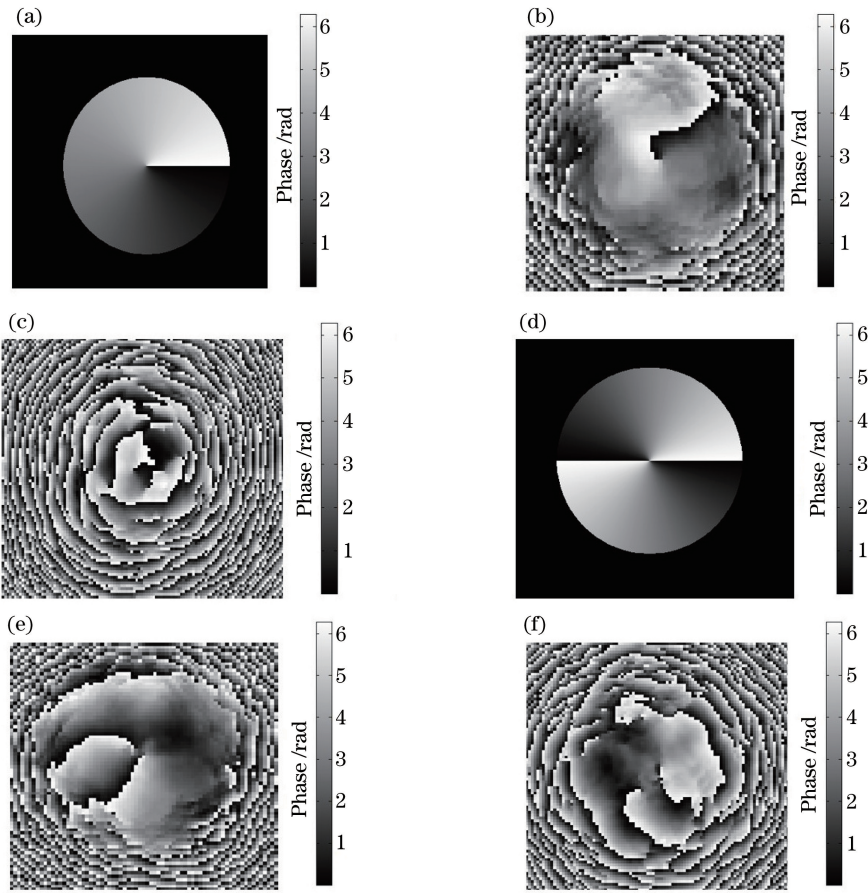


图 2 拓扑荷数 $m=1$ 及 $m=2$ 时涡旋光束在海洋湍流中传输到不同距离处的相位分布。(a) $m=1, z=0$ m; (b) $m=1, z=100$ m; (c) $m=1, z=300$ m; (d) $m=2, z=0$ m; (e) $m=2, z=100$ m; (f) $m=2, z=300$ m

Fig. 2 Phase distributions of vortex beams with topological charges $m=1$ and $m=2$ propagating at different propagation distances in oceanic turbulence. (a) $m=1, z=0$ m; (b) $m=1, z=100$ m; (c) $m=1, z=300$ m; (d) $m=2, z=0$ m; (e) $m=2, z=100$ m; (f) $m=2, z=300$ m

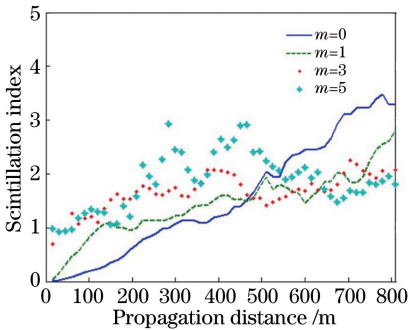


图 3 不同拓扑荷数的涡旋光束在海洋湍流中传输后轴上点的闪烁因子随传输距离的变化

Fig. 3 On-axis scintillation indices of vortex beams with different topological charges when they propagate different distances in oceanic turbulence

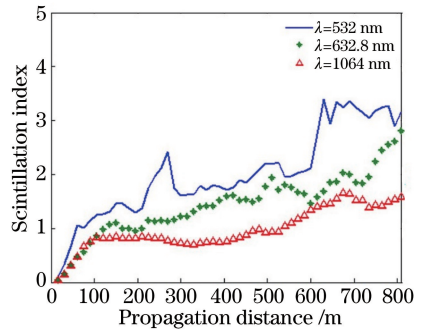


图 4 不同波长的涡旋光束在海洋湍流中传输后轴上点的闪烁因子随传输距离的变化

Fig. 4 On-axis scintillation indices of vortex beams with different wavelengths when they propagate different distances in oceanic turbulence

的海洋湍流中传输后轴上点闪烁因子的变化情况,相应参数取值为 $\lambda=632.8$ nm, $x_t=10^{-7}$ K²/s, $\omega=-2.5$ 。由图可以看出,在较近距离处,涡旋光束轴上点闪烁因子随传输距离的增大而增加,但

随着传输距离的增大,涡旋光束轴上点闪烁因子的增加速度逐渐减慢,且当湍流较弱如 $x_t=10^{-8}$ K²/s时,涡旋光束轴上点的闪烁因子几乎停止增长。而在相同传输距离处,随着单位质量液

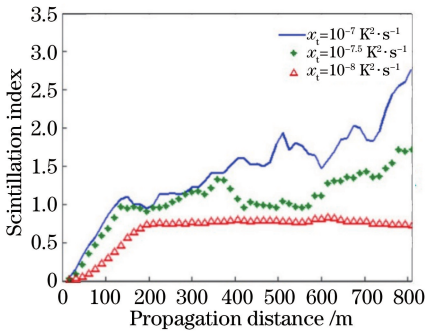


图5 海洋湍流中拓扑荷数 $m=1$ 的涡旋光束在不同 x_t 取值情况下的闪烁因子

Fig. 5 On-axis scintillation indices of vortex beams with topological charge $m=1$ when they propagate in oceanic turbulence with different x_t

体中的均方温度耗散率 x_t 的增大, 闪烁因子的值越来越大。

图6所示为 $m=1$ 的涡旋光束在不同 ϵ 取值的海洋湍流中传输后轴上点闪烁因子的变化情况, 相应参数取值为 $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $x_t=10^{-8} \text{ K}^2/\text{s}$, $w=-2.5$ 。由图可以看出, 在相同传输距离处, 随着单位质量液体中湍流能耗散率 ϵ 的增大, 闪烁因子的值越来越小。

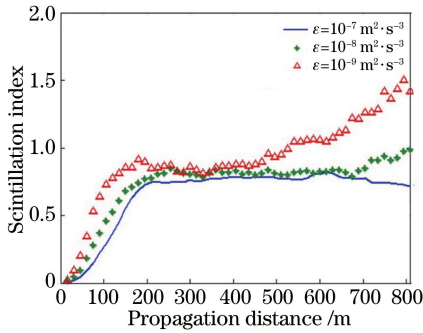


图6 海洋湍流中拓扑荷数 $m=1$ 的涡旋光束在不同 ϵ 取值下的轴上点闪烁因子

Fig. 6 On-axis scintillation indices of vortex beams with topological charge $m=1$ when they propagate in oceanic turbulence with different ϵ

图7所示为 $m=1$ 的涡旋光束在不同 w 取值的海洋湍流中传输后轴上点闪烁因子的变化情况, w 为温度、盐度波动的相对强度。相应参数取值为 $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $x_t=10^{-8} \text{ K}^2/\text{s}$, $\epsilon=10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。由图可以看出, 在相同传输距离处, w 的取值越大, 闪烁因子越大。图5~7中, 随着均方温度耗散率 x_t 的增大、 w 值的增大及 ϵ 的减小, 模拟的海洋湍流强度也在增大, 湍流增强会导致闪烁因子变大, 因此同一传输位置处的闪烁因子变大。

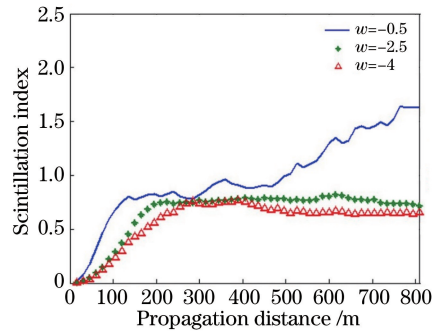


图7 海洋湍流中拓扑荷数 $m=1$ 的涡旋光束在不同 w 取值下的闪烁因子

Fig. 7 On-axis scintillation indices of vortex beams with topological charge $m=1$ when they propagate in oceanic turbulence with different w

4 结 论

采用分步相位屏方法对涡旋光束在海洋湍流中的光强和闪烁指数进行了仿真模拟。研究发现, 随着传输距离的增加, 涡旋光束的光斑逐渐扩散开来, 且中心暗斑也在逐渐消失, 光强分布变得不稳定。通过分析闪烁因子随不同海洋湍流参数的变化可知, 当海洋湍流强度变大, 即 x_t 变大或 w 变大或 ϵ 变小时, 涡旋光束的闪烁因子也随之变大。比较高斯光束和涡旋光束的闪烁因子发现, 当光束传输一定距离时, 涡旋光束的闪烁因子会逐渐低于高斯光束, 且拓扑荷数越大, 闪烁因子降低得越明显。另外, 传输距离相同时, 波长越小的涡旋光束闪烁因子越大。

参 考 文 献

- [1] Hill R J, Clifford S F. Modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations and its application to optical propagation[J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(7): 892-899.
- [2] Xu J, Zhao D M. Propagation of a stochastic electromagnetic vortex beam in the oceanic turbulence [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 189-193.
- [3] Tang M M, Zhao D M. Spectral changes in stochastic anisotropic electromagnetic beams propagating through turbulent ocean [J]. Optics Communications, 2014, 312: 89-93.
- [4] Xu J, Tang M M, Zhao D M. Propagation of electromagnetic non-uniformly correlated beams in the oceanic turbulence [J]. Optics Communications, 2014, 331: 1-5.
- [5] Zhu W T, Tang M M, Zhao D M. Propagation of

- multi-Gaussian Schell-model beams in oceanic turbulence[J]. *Optik*, 2016, 127(8): 3775-3778.
- [6] Lu L, Ji X L, Li X Q, *et al.* Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of Gaussian array beams[J]. *Optik*, 2014, 125(24): 7154-7161.
- [7] Yang T, Ji X L, Li X Q, *et al.* Propagation characteristics of partially coherent decentred annular beams propagating through oceanic turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 204206.
杨婷, 季小玲, 李晓庆, 等. 部分相干环状偏心光束通过海洋湍流的传输特性[J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 204206.
- [8] Yousefi M, Kashani F D, Golmohammady S, *et al.* Scintillation and bit error rate analysis of a phase-locked partially coherent flat-topped array laser beam in oceanic turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(12): 2126-2137.
- [9] Nootz G, Jarosz E, Dalglish F R, *et al.* Quantification of optical turbulence in the ocean and its effects on beam propagation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8813-8820.
- [10] Luo Y J, Ji X L, Li X Q. Numerical simulation of imaging by diffuse reflection light from extended objects in oceanic turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1105001.
罗燊娟, 季小玲, 李晓庆. 海洋湍流中扩展物体漫反射光成像的数值模拟[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1105001.
- [11] Niu C J, Lu F, Han X E. Propagation properties of Gaussian array beams transmitted in oceanic turbulence simulated by phase screen method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0601004.
牛超君, 卢芳, 韩香娥. 相位屏法模拟高斯阵列光束海洋湍流传输特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0601004.
- [12] Yang T X, Zhao S M. Random phase screen model of ocean turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1201001.
杨天星, 赵生妹. 海洋湍流随机相位屏模型[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1201001.
- [13] Xiao X F, Korotkova O, Voelz D. Laboratory investigation of the spectral exponent effect on scintillation in non-Kolmogorov turbulence [C] // *Propagation Through and Characterization of Distributed Volume Turbulence 2014*, July 13-17, 2014, Seattle, Washington, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: PM3E.3.
- [14] Liu Y X, Chen Z Y, Pu J X. Propagation of stochastic electromagnetic high-order Bessel-Gaussian beams in the oceanic turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(12): 124205.
刘永欣, 陈子阳, 蒲继雄. 随机电磁高阶 Bessel-Gaussian 光束在海洋湍流中的传输特性[J]. *物理学报*, 2017, 66(12): 124205.
- [15] Liu X H, Pu J X. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26444-26450.